



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 43 13 860 A 1**

⑳ Aktenzeichen: P 43 13 860.8
㉑ Anmeldetag: 28. 4. 93
㉒ Offenlegungstag: 3. 11. 94

㉓ Int. Cl.⁵:
G 01 C 11/00
G 01 B 11/30
G 01 J 3/00
G 01 J 3/46
G 03 B 35/00
// G 02 B 5/20

DE 43 13 860 A 1

㉔ Anmelder:
Lampalzer, Ralf, 90607 Rückersdorf, DE

㉕ Erfinder:
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉖ Optischer Sensor zur Formerfassung dreidimensionaler Objekte

DE 43 13 860 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen optischen Sensor zur Formerfassung dreidimensionaler Objekte, beruhend auf dem Prinzip der pixelweise parallel arbeitenden Triangulationssensoren.

1. Stand der Technik und Aufgabenstellung

Für die berührungslose Vermessung von Oberflächen im Raum werden optische 3D-Sensoren verwendet. Ein weit verbreitetes Prinzip für 3D-Messungen ist die aktive Triangulation. Dazu wird das Objekt strukturiert aus einer Richtung beleuchtet und aus einer anderen Richtung beobachtet.

Ein Sensor soll in möglichst kurzer Zeit eine möglichst große Anzahl von 3D-Meßdaten bei möglichst hoher Meßgenauigkeit liefern.

Es ist bekannt, zur Erfüllung dieses Zwecks Sensoren einzusetzen, bei denen das gesamte Objekt strukturiert beleuchtet wird, und die für jeden Kamerapixel einzeln einen Höhenwert (der Abstand eines Oberflächenpunkts zur Kamera) ermitteln. Beispiele für diese Art von Belichtung sind das phasenmessende Moiréverfahren [1] [2], der codierte Lichtansatz [3] [4] oder die Farb-Triangulation [6]. Solche Sensoren sind deswegen besonders für die schnelle 3D-Formerfassung geeignet, da immer parallel eine sehr große Zahl von Bildpunkten gewonnen werden kann.

2. Kritik am Stand der Technik

Jedoch ist die Anzahl der sequentiell projizierten Belichtungen beim Codierten Lichtansatz und beim phasenmessenden Triangulationsverfahren unnötig hoch (wie im Verlauf der Beschreibung gezeigt werden wird) und erhöht damit einerseits den technischen Aufwand für den Sensor und andererseits die Zeit, in der die 3D-Rekonstruktion erfolgen kann.

Beim Farb-Triangulationsverfahren wird zwar nur eine Belichtung projiziert, jedoch ist die Anzahl der unterscheidbaren Höhenstufen unnötig gering.

3. Aufgabe

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das Verhältnis zwischen der Anzahl der projizierten Belichtungen und der resultierenden Anzahl von Höhenstufen zu optimieren.

Diese Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Eine weitere Lösung wird durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 2 erreicht, dabei ist grundsätzlich nur eine einzige Belichtung nötig.

4. Erzielbare Vorteile

Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile bestehen in

- Einer Verkürzung der Meßzeit
- einer Vergrößerung der Anzahl der Höhenstufen und
- einer Verringerung des technischen Aufwands zum Bau eines entsprechenden Sensors.

Die Datenrate eines Sensors nach Anspruch 1 oder 2 liegt (bei Verwendung von Standard-TV-Kameras) in der Größenordnung von 2 Mio. 3D-Meßdaten pro Sekunde.

Ein Sensor nach Anspruch 1 oder 2 kann eine Datenrate liefern, die in der Größenordnung von 2 Mio. 3D-Meßdaten pro Sekunde liefern.

5. Beschreibung der Erfindung

In dieser Beschreibung wird, weil es sachlich geboten ist, zunächst die Erfindung nach Anspruch 1 beschrieben, erst danach wird die Realisierung gemäß Anspruch 2 erläutert.

Der Aufbau des Sensors ergibt sich aus einer Kette von logischen Betrachtungen und Rechnungen; diese Betrachtungen führen im Fall des Anspruchs 1 zu einer Regel zur Konstruktion des Projektionssystems.

Die Beschreibung bedient sich dabei einer sehr mathematischen Sprache, weil es sachlich geboten ist. Es handelt sich dabei aber immer um Überlegungen zur Gestaltung der Intensitätsverteilungen.

5.1 Systemtheoretische Modellierung eines punktwise arbeitenden 3D-Sensors

Wir gehen von einem pixelweise parallel arbeitenden Sensor, der gemäß Abb. 1 arbeitet, aus.

Wir wollen den Kamerapixel mit den Koordinaten (x_0, y_0) betrachten.

Der topographische Punkt, der mit Hilfe dieses Pixels rekonstruiert werden soll, liegt dann auf einer Geraden, die durch den Pixel (x_0, y_0) und den Hauptpunkt des optischen Systems des Kameraobjektivs gegeben ist. Für die vollständige 3D-Rekonstruktion muß also nur noch der Abstand zur Kamera bestimmt werden.

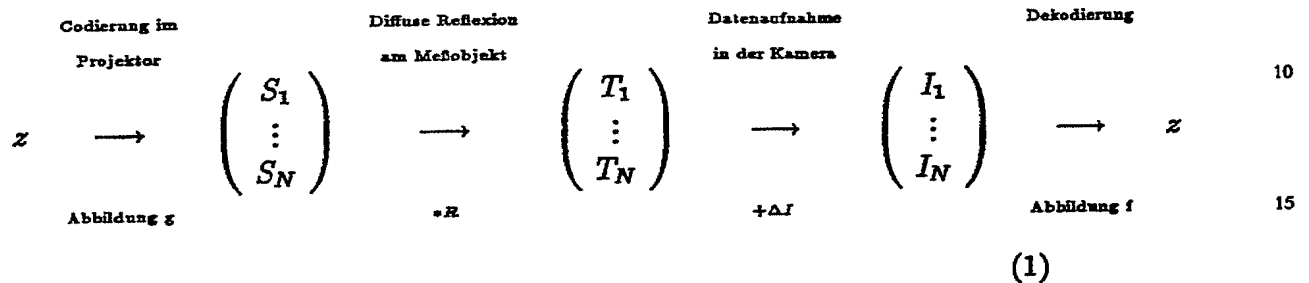
Aufgabe des Projektors (oder eines Systems von Projektoren) ist es, die einzelnen Abstände, die in Abb. 1 als Kästchen dargestellt sind, mit Licht zu markieren.

Dies geschieht durch N sequentiell projizierte Einzelbelichtungen. Die Intensitäten dieser Belichtungen sind

Funktionen des räumlichen Freiheitsgrades z und sollen mit $S_j(z)$ bezeichnet werden. ($1 \leq j \leq N$).

Das Licht wird am Meßobjekt diffus reflektiert. Das reflektierte Licht mit der Intensität T_j gelangt in die Kamera und wird in ein elektronisches Signal der Stärke I_j umgewandelt. Die darauffolgende Dekodierung gestattet es, den Freiheitsgrad z den gemessenen Intensitäten wieder zuzuordnen.

Dieser Vorgang läßt sich formalisieren:



Bei dieser Formalisierung ist nur ein einzelnes Kamerapixel betrachtet worden. Aus den N Beobachtungen resultieren also N in diesem Pixel ausgelesene Intensitäten I_1, \dots, I_N .

Aus diesen Intensitäten muß der Freiheitsgrad z bestimmt werden. Das gelingt in der Dekodierungsphase mit Hilfe der Abbildung f :

$$f_{x_0, y_0} : I_1 \dots I_N \rightarrow z \quad (2)$$

Das Kamerarauschen ΔI kann als additives Rauschen betrachtet werden. (Diese Tatsache ist ein experimentelles Ergebnis aus meinen Messungen.) Deswegen wird der relative Fehler bei einer Intensitätsmessung umso kleiner, je größer die gemessene Intensität ist.

Im weiteren Verlauf wird eine Fehlerbetrachtung für die Abbildung f_{x_0, y_0} durchgeführt, und es wird gezeigt, wie sich das Kamerarauschen ΔI per Fehlerfortpflanzungsrechnung auf ein Δz abbildet. Dieser Prozeß begrenzt die Genauigkeit aller pixelweise parallel arbeitenden Sensoren.

Umgekehrt liefert die Fehlerbetrachtung auch eine Vorschrift für das Design strukturierter Beleuchtungen, mit deren Hilfe eine maximale Anzahl von Höhenstufen unterschieden werden kann.

5.2 Invarianz des Sensors gegenüber der Objektreflektivität

Das Meßobjekt hat eine unbekannte, örtlich variable Reflektivität. Die eingestrahltene Beleuchtungsstärke (S_1, \dots, S_N) werden deshalb bei der Reflexion mit einem unbekannten Faktor multipliziert, der zudem von Kamerapixel zu Kamerapixel variieren kann.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} = R(x_0, y_0) * \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix}; \quad (3)$$

Damit der Sensor invariant gegenüber der Objektreflektivität arbeiten kann, muß ein bestimmter Vektor von gemessenen Intensitäten (I_1, \dots, I_N) eine Äquivalenzklasse mit allen Vektoren der Form $C * (I_1, \dots, I_N)$ bilden, d. h. alle solchen Vektoren müssen als Argument der Funktion f auf den gleichen Wert z abgebildet werden.

Aus dieser Tatsache läßt sich eine Strategie für die Beleuchtung ableiten:

Die einzelnen Beleuchtungsstärken S_i können Werte zwischen 0 und einem Wert S_{\max} , den der Projektor maximal liefern kann, annehmen. Der Vektor der Beleuchtungsstärken (S_1, \dots, S_N) läßt sich wegen der geforderten Invarianz ohne weiteres mit einem skalaren Faktor C umnormieren, ohne daß das System letztendlich einen anderen Wert für z ausgibt.

Die Beleuchtungsstärken sollten nun so normiert werden, daß der Maximalwert des Projektors S_{\max} auch ausgenutzt wird, d. h. an jeder Stelle z soll mindestens eine der Beleuchtungsstärken den maximal erreichbaren Wert annehmen.

Andernfalls wäre der von der Kamera gemessene Vektor (I_1, \dots, I_N) mit einem höheren relativen Fehler behaftet und z würde zwangsläufig mit geringerer Genauigkeit bestimmt werden.

Die Komponenten der Kamera und des Auswertungssystems sind dann so einzustellen, daß bei der Beleuchtungsstärke S_{\max} das System gerade noch nicht übersteuert ist, wenn das Meßobjekt im betrachteten Punkt die maximale Reflexion aufweist.

5.3 Anforderungen an die Strukturierte Beleuchtung

Die Erfindung beruht darauf, daß der Code die folgenden Forderungen erfüllt:

Eindeutigkeit (Injektivität)

Jeder Wert von z muß eindeutig auf eine Äquivalenzklasse von Intensitäten abgebildet werden. Diese Bedingung ist für das Funktionieren eines Sensors absolut notwendig.

Vollständigkeit (Surjektivität)

Es soll umgekehrt zu jeder Äquivalenzklasse von Intensitäten auch einen Wert z geben, dessen Code eben jene Äquivalenzklasse ist. Aufgrund des Kamerarauschens läßt sich nur eine endliche Anzahl von Äquivalenzklassen (und damit Höhenstufen) unterscheiden. Eine maximal unterscheidbare Anzahl von Höhenstufen läßt sich nur dann erreichen, wenn jeder Äquivalenzklasse auch ein Wert von z entspricht. (Dieses Prinzip ist beim phasenmessenden Moiréverfahren bereits verletzt, wie später gezeigt werden wird.)

Äquidistanz

Die Forderungen nach Eindeutigkeit und Vollständigkeit gewährleisten, daß eine maximale Anzahl von Höhenstufen unterschieden werden kann.

Die unterscheidbaren Höhenstufen sollen äquidistant längs des Freiheitsgrades z angeordnet sein, um die Genauigkeit des Sensors längs z konstant zu halten.

Maximalität

Dieses Prinzip wurde bereits begründet. Es fordert, daß mindestens eine der Beleuchtungsstärken den maximalen Wert annimmt. Ein entsprechender Code soll als "maximalitätstreu" bezeichnet werden.

Stabilität gegenüber Kamerarauschen

Wenn ein Punkt (I_1, \dots, I_N) auf einen Wert z abgebildet wird, soll auch eine Umgebung dieses Punktes mit auf eine Umgebung von z abgebildet werden.

Diese Umgebung des Punktes (I_1, \dots, I_N) muß so groß sein, daß eine Störung dieses Punktes, die vom Kamerarauschen herrührt, nicht aus dem Bereich herausführt und sprunghaft zu einem sehr großen Fehler führt.

5.4 Entwicklung eines Codes für ein System mit zwei Belichtungen

Wir wollen nun ein System mit zwei Belichtungen betrachten und die aufgestellten Forderungen anwenden. Dabei kommen wir zu der angekündigten Fehlerrechnung:

Zwei Vektoren von Intensitäten sind dann äquivalent, wenn gilt:

$$\begin{aligned} (I_1, I_2) &= C * (I'_1, I'_2) \\ \Leftrightarrow \frac{I_1}{I_2} &= \frac{I'_1}{I'_2} \end{aligned} \quad (4)$$

d. h. jede Äquivalenzklasse von Intensitäten entspricht einem bestimmten Quotienten.

$$Q := \frac{S_1}{S_2} \quad (5)$$

Demnach muß es für einen eindeutigen und vollständigen Code eine umkehrbare Abbildung $z \leftrightarrow Q$ geben. Für die Rechnung benötigen wir z als Funktion von Q .

Die Forderungen nach Eindeutigkeit und Vollständigkeit lassen sich in diesem System leicht erfüllen: es müssen nur alle Quotienten durchlaufen werden.

Wegen der Maximalitätsforderung soll zunächst die Funktion S_2 auf dem Wert S_{\max} festgehalten werden, während S_1 von 0 auf S_{\max} ansteigt. (Um alle möglichen Kombinationen abzudecken, werden wir später auch den umgekehrten Fall diskutieren)

Wir suchen also die Funktion $S_1(z)$, die die Forderungen nach Äquidistanz und Stabilität gegenüber dem Kamerarauschen erfüllt (siehe Abb. 2).

In diesem Bereich ist $Q \in [0; 1]$. Gesucht ist also die Funktion $S_1(z)$. Diese Funktion können wir erhalten, wenn wir nun die Äquidistanz fordern:

$$\Delta z = \text{const}_z \quad (6)$$

Nun führen wir auf der Basis von Beziehung 1 eine Fehlerfortpflanzungsrechnung durch, in der wir Δz letztendlich durch ΔI ausdrücken wollen. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned}
\Delta z &= \frac{dz}{dQ} \Delta Q; \\
\Delta Q &= \sqrt{\frac{\partial Q}{\partial S_1} \Delta S_1 + \frac{\partial Q}{\partial S_2} \Delta S_2} \\
\Delta S_1 &= \frac{\partial S_1}{\partial I_1} \Delta I_1; \Delta S_2 = \frac{\partial S_2}{\partial I_2} \Delta I_2 \\
\Delta I_1 &= \Delta I_2 = \Delta I = \text{const.}
\end{aligned} \tag{7}$$

Die Fehlerfortpflanzung endet beim Kamerauschen ΔI , das wir als konstant angesehen haben.
 Wenn man die Partialableitungen unter Verwendung der Beziehungen (5) und (3) ausführt, gelangt man zu der Beziehung:

$$\Delta z = \frac{dz}{dQ} * \frac{1}{R} \frac{\Delta I}{I_2} * \sqrt{1 + \left(\frac{I_1(z)}{I_2} \right)^2} \tag{8}$$

In diesem Ausdruck sind die Größen R , ΔI und I_2 nicht von z abhängig, während I_1 eine Funktion von z ist.
 Wir erkennen daß der Term unter der Wurzel eine Funktion von z ist, daß also der Fehler Δz nicht konstant bleibt; wenn $\frac{dz}{dQ}$ konstant wäre.

z darf also nicht in linearer Weise von Q abhängen.

Wenn wir jetzt Δz als konstant fordern, ergibt sich aus (8) folgende Differentialgleichung:

$$\frac{dz}{dQ} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2}} * C_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2}} * C_1 \tag{9}$$

$$\text{mit } C_1 := \frac{I_2 * R * \Delta z}{\Delta I} = \text{const.}_z$$

Daraus läßt sich per Integration die gesuchte Abbildung zwischen z und Q bestimmen:

$$z(Q) = \int_a^Q \frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} dq - C_1 + z(a) \tag{10}$$

$$\boxed{= z(Q) = \text{arsinh}(Q) - C_1 + C_2}$$

Der entscheidende Schritt ist hiermit getan. Die Konstanten Δz und $z(a)$ werden günstigerweise so gewählt, daß die Werte von z das Intervall $[0; 1]$ durchlaufen. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{1}{\text{arsinh}(1)}; \\
C_2 &= 0;
\end{aligned} \tag{11}$$

Nun können wir auch den analogen Code für zwei Belichtungen angeben: S_2 war im betrachteten Intervall konstant. Wegen

$$Q = \sinh\left(\frac{z}{C_1}\right) \tag{12}$$

gilt für S_1 :

$$S_1 = S_2 \sinh\left(\frac{z}{C_1}\right) \tag{13}$$

Mit anderen Worten: Die in Abb. 2 gesuchte Funktion war der sinus hyperbolicus.
 Wir müssen nun noch alle die Möglichkeiten hinzunehmen, bei denen $S_1 = S_{\max}$ ist. Dies wird dazu führen, das die Abb. 2 symmetrisch ergänzt werden kann, womit dann alle möglichen Quotienten abgedeckt sind.

Wir wollen aber versuchen, das Hinzufügen eines symmetrischen Bereichs von einem höheren Standpunkt aus zu verstehen:

Die Grundmenge, aus der wir die Werte für z entnehmen können, soll als "Zustandsraum des Projektionssystems" bezeichnet werden. Dieser Zustandsraum hat aufgrund der obigen Konstruktion die Eigenschaft, daß die unterscheidbaren Zustände auf gleich große Teilintervalle Δz abgebildet werden.

Die Rolle des Referenzwertes I_2 kann ebenso von I_1 übernommen werden. Grundsätzlich kann das dekodierende System diese zwei übergeordneten Merkmale unterscheiden, weil die Eigenschaft einer Intensität, größer als eine andere zu sein, nicht verloren geht, wenn die Intensitäten mit dem gleichen Faktor (der Reflektivität) multipliziert werden.

Das System kann daher neben dem Wert z noch eine natürliche Zahl k , die Platzierung des Referenzwertes, übertragen. Bei einem System mit N Belichtungen gibt es N mögliche Platzierungen — in unserem System entsprechend nur zwei Platzierungen. Damit erweitert sich der Zustandsraum des Projektionssystems von einem Intervall $[0; 1]$ auf zwei nebeneinanderliegende Intervalle, deren gegenseitige Anordnung noch nicht festgelegt ist.

Jede dieser Intervalle weist jedoch eine Besonderheit an einem ihrer Intervallgrenzen auf, wenn gilt $z = 1$. Dieser Zustand bedeutet nichts anderes, als daß beide Intensitäten gleich groß sind.

An dieser Stelle ist die Platzierung des Referenzwertes nicht mehr eindeutig feststellbar, d. h. es wäre möglich, dem Zustand zwei Punkte an den Enden der beiden getrennten Intervalle zuzuordnen. Einen solchen Zustandsraum des Projektionssystems zu konstruieren wäre aber ungünstig, denn wir wollen fordern, daß jeder Punkt in diesem Zustandsraum genau einem vom Dekoder unterscheidbaren Zustand entspricht.

Zwangsläufig müssen die beiden Punkte identisch sein. Wir sind also gezwungen, die beiden Intervalle an den Intervallgrenzen $z = 1$ zusammenzufügen. Das entstehende mathematische Objekt ist wieder ein Intervall, nämlich $[0; 2]$.

5.5 Diskussion eines Zustandsraumes für Systeme mit mehr als zwei Belichtungen

Es sollen nun N Belichtungen sequentiell auf das Objekt projiziert werden. Wegen der Maximalitätsforderung soll in jedem Punkt des beleuchteten Objekts mindestens eine der N Beleuchtungsstärken den maximalen Wert annehmen.

Die Belichtung S_k soll nun als Referenz dienen, sie entspricht damit S_2 in der vorangegangenen Diskussion.

Mit ihrer Hilfe läßt sich nun nicht mehr nur ein Quotient, sondern $N-1$ Quotienten definieren, die $N-1$ Freiheitsgrade ζ_i entsprechen:

$$\begin{aligned} \zeta_1 &:= \operatorname{arsinh}(S_1/S_k) - C_1; \\ &\dots \\ \zeta_{k-1} &:= \operatorname{arsinh}(S_{k-1}/S_k) - C_1; \\ \zeta_k &:= \operatorname{arsinh}(S_{k+1}/S_k) - C_1; \\ &\dots \\ \zeta_{n-1} &:= \operatorname{arsinh}(S_N/S_k) - C_1; \end{aligned} \quad (14)$$

Wir haben jetzt als nicht mehr nur einen räumlichen Freiheitsgrad z vorliegen, sondern $N-1$ (zunächst abstrakte) Freiheitsgrade. Da es sich nicht mehr um räumliche Freiheitsgrade handelt, wurden nicht das Symbol z , sondern das Symbol ζ verwendet.

Der jeweilige Wert der einzelnen Freiheitsgrade läßt sich unabhängig voneinander einstellen, da jeder Freiheitsgrad mit einem noch freien Parameter S_i gekoppelt ist.

Die Werte ζ_i können anschaulich als relative Helligkeit der Belichtungen zum Referenzwert interpretiert werden.

Von jedem dieser Freiheitsgrade kann aufgrund des Kamerarauschens eine bestimmte Anzahl verschiedener Werte unterschieden werden. Bei Verwendung einer Standard-TV-Kamera lassen sich etwa 20 verschiedene Werte unterscheiden. (experimentelles Ergebnis aus eigenen Messungen).

Der Projektor bildet dann den räumlichen Freiheitsgrad z zunächst auf einen bestimmten Satz von Werten der ζ_i ab.

$$z \quad \xrightarrow{\text{Abbildung } g_1} \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_{N-1} \\ k \end{pmatrix} \quad \xrightarrow{\text{Abbildung } g_2} \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix}$$

Abbildung g_1

Abbildung g_2

$$g_1 \circ g_2 = g$$

(15)

Der Dekoder arbeitet mit der umgekehrten Abbildung:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Abbildung } f_1} \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_{N-1} \\ k \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Abbildung } f_2} z$$

$f_1 \circ f_2 = f$

Durch diesen Trick wurde die Anzahl der unterscheidbaren Höhenstufen potenziert!
 Eine Abbildung der Art von g_1 ist als "Kurve" des Punktes $(\zeta_1, \dots, \zeta_N(z), k(z))$ interpretierbar.
 — zwei Freiheitsgrade, ζ_1 und ζ_2 ,

übertragen.

An dieser Stelle müssen wir einige Betrachtungen zur Topologie dieses Zustandsraumes anstellen:

Es liegt also im konkreten Fall dreimal das mathematische Objekt $[0; 1] - [0; 1]$ vor, also drei endliche, quadratische Flächen.

Wir wollen uns nun überlegen, in welcher Art die drei quadratischen Flächen aneinandergesetzt werden müssen. Dabei werden wir jedoch feststellen, daß der Zustandsraum eine komplizierte Topologie aufweist. Wie wir erkennen werden, müssen wir drei Flächen zu einer Topologie gemäß Abb. 3 verbinden.

Jede der drei Flächen weist nämlich eine Besonderheit an zwei ihrer begrenzenden Kanten auf: an der Kante $\zeta_1 = 1$ und an der Kante $\zeta_2 = 1$. Wenn ein Zustand projiziert werden soll, der an einer solchen Kante liegt, sind zwei der drei Intensitäten gleich groß, und die Platzierung des Referenzwertes ist nicht mehr eindeutig feststellbar, d. h. es wäre möglich, dem Zustand zwei Punkte auf den Kanten zweier verschiedener Flächen zuzuordnen. Zwangsläufig müssen die beiden Punkte identisch sein, d. h. die Flächen müssen an den Kanten mit $\zeta = 1$ zusammengefügt werden.

5.6 Entwicklung eines pixelweise arbeitenden 3D-Sensors für ein System mit mehr als zwei Belichtungen

Nun soll ein Sensor für ein System mit mehr als zwei Belichtungen entwickelt werden.

Dies geschieht in folgender Art und Weise: Zunächst wird eine Kurve vorgegeben; sie gibt an, welche Zustände räumlich hintereinander auf das Objekt projiziert werden sollen.

Abb. 4 zeigt die einfachste mögliche Kurve für ein System mit 3 Belichtungen.

Die in Abb. 4 gezeigte Kurve nicht die einzig mögliche, sondern Repräsentant einer Klasse möglicher Kurven, die das Verlangte leisten.

Aus der Kurve lassen sich die Funktionen $S_1(z), \dots, S_N(z)$ bestimmen.

Der Konfidenzbereich $\Delta\zeta$ entspricht der Kantenlänge eines der kleinen Quadrate, die die einzelnen unterscheidbaren Zellen des Zustandsraumes darstellen. Bildlich gesprochen werden die unterscheidbaren Zellen — wie an einer Perlenschnur — entlang des räumlichen Freiheitsgrades z aufgereiht.

Wir wollen nun noch explizit untersuchen, ob die Forderung nach Stabilität gegenüber dem Kamerarauschen erfüllt ist:

Bei Systemen mit mehr als zwei Belichtungen hatte der Zustandsraum des Projektionssystems nicht mehr die mathematische Form eines Intervalls, sondern die eines höherdimensionalen Gebildes. Der Zustandsraum mußte aber zwangsläufig auf ein Intervall abgebildet werden. Dies geschah durch die Einführung der Kurve. Ein Fehler in der Lokalisation eines Punktes im Zustandsraum kann nun zu zweierlei Arten von Fehlern in der Bestimmung von z führen:

- longitudinale Versetzungen sie führen zu kleinen Fehlern längs der Kurve.
 - transversale Sprünge von einem Teil der Kurve zu einem anderen in der Nähe befindlichen Teil.
- Ein solcher Sprung würde das Übertragungssystem (1) in fataler Weise überlisten. Und zu einem Fehler führen, der viel größer ist, als es die Fehlerfortpflanzungsrechnung vorhersagt.

Ein transversaler Sprung verletzt die Forderung nach Stabilität gegenüber dem Kamerarauschen. Transversale Sprünge müssen also vermieden werden. Es ist prinzipiell unmöglich, solche Sprünge völlig auszuschließen, also muß die Wahrscheinlichkeit für transversale Sprünge klein gehalten werden.

Das ist erreichbar, indem der transversale Abstand, also der minimale Abstand, den zwei nebeneinanderlaufende Teilabschnitte der Kurve zueinander haben, groß genug bleibt.

Daher wird bei der gattungsgemäßen Einrichtung meiner Erfindung ein transversaler Abstand gewählt, der mindestens 3 Standardabweichungen beträgt.

6. Resultate der Überlegungen

Nun sind in einer Kette logischer Schlußfolgerungen ein neuer Typ von 3D-Sensoren entstanden.

Die verwendete Codierung ist nur im Fall des Systems mit 2 Belichtungen eindeutig, bei Systemen mit mehr als

2 Belichtungen ergibt sich eine ganze Klasse von gleichwertigen Codes, die als Bestandteil des Sensors in Frage kommen.

Die Wahl der Kurve im Zustandsraum ist (ähnlich wie die Wahl der Bahn eines Mähdreschers auf einem Feld) nicht eindeutig. Wir fassen die Kriterien für die Wahl dieser Bahn zusammen:

- Die Bahn muß überschneidungsfrei sein.
- Die Bahn wird von einer Art "Schlauch" von einer bestimmten Breite umgeben.
- Die Bahn und der "Schlauch" müssen den gesamten Zustandsraum abdecken. (Der Grund dafür ist die geforderte Surjektivität)

7. Ein Weg zur Ausführung der Erfindung

Anhand der Kurve aus Abb. 4 sollen die drei Intensitätsverteilungen angegeben werden, die dieser Kurve entsprechen. Diese Intensitätsverteilungen lassen sich nun mit Hilfe der Definitionen 14 berechnen, der Verlauf der Intensitätsverteilungen ist in Abb. 5 dargestellt.

Ein möglicher Sensor zur Formerfassung dreidimensionaler Objekte gemäß Anspruch I arbeitet zusammenfassend nun nach folgendem Prinzip:

1. Eine Belichtungseinheit projiziert nacheinander drei Streifenmuster auf ein Meßobjekt, deren funktionaler Verlauf in Abb. 5 gezeigt ist.
2. Die Kamera nimmt jeweils ein Bild auf.
3. Der Dekoder kann für jeden Kamerapixel einzeln aus den beobachteten Intensitäten den Abstand zur Kamera eindeutig ermitteln. Der Grund dafür liegt in der mathematischen Konstruktion der Belichtungen.

8. Vorteilhafte technische Wirkungen der Realisierung der Erfindung nach Anspruch 1 unter Bezugnahme auf den Stand der Technik

Es wurde ein pixelweise parallel arbeitender 3D-Sensor entwickelt, der eine maximale Anzahl von Höhenstufen unterscheiden kann.

Um die vorteilhaften Wirkungen des Sensors demonstrieren zu können, soll der Sensor mit 3 Belichtungen mit dem phasenmessenden Moiréverfahren verglichen werden.

Beim phasenmessenden Moiréverfahren sind die Funktionen $S_1(z)$, ..., $S_3(z)$ drei Sinus-Funktionen, die zueinander eine Phasenverschiebung von 120° aufweisen. Gemäß der Definition der Koordinaten σ_1 in (14) läßt sich die entsprechende Kurve zeichnen. Sie ist in Abb. 5 dargestellt.

Nachteile des phasenmessenden Moiréverfahrens:

- Verletzung der Maximalität

Es ist nicht zu jedem Zeitpunkt eine der drei Intensitätsverteilungen maximal. Dadurch ist der Fehler des Sensors prinzipiell größer als nötig

- Verletzung der Vollständigkeit (Surjektivität)

Jeder unterscheidbare Zustand entspricht in Abb. 5 einem Kästchen.

Es gibt Zustände, die das dekodierende System unterscheiden könnte, die aber vom Projektor an keiner Stelle z codiert werden. Die Kurve tangiert die entsprechenden Kästchen nicht. Daraus ergibt sich:

Das Phasenmessende Triangulationsverfahren nutzt den zur Verfügung stehenden Vorrat an Codewörtern nur zu einem Bruchteil aus.

9. Beschreibung der Realisierung der Erfindung nach Anspruch 2

Bei der Einrichtung der Erfindung gemäß Anspruch 2 wird ein Spektrum verschiedener Wellenlängen auf das Meßobjekt projiziert und das Objekt auf diese Weise markiert.

Als Gedankenexperiment werden nun vor den Projektor nacheinander Farbfilter gebracht, deren Transmissionskennlinie genau den funktionalen Verlauf aufweist, wie er für die Intensitätsverteilungen hergeleitet wurde. Die Farbfilter "übersetzen" also die Markierung mit Wellenlängen in eine Markierung mit Intensitäten. Die Intensitäten werden von der Kamera aufgenommen, erst dabei wird ein Rauschen addiert.

Diese Realisierung der Erfindung ist vom informationstheoretischen Standpunkt aus gesehen völlig äquivalent zur Realisierung nach Anspruch 1.

Aufgrund der Linearität optischer Systeme können die Farbfilter auch erst unmittelbar vor der Kamera eingebaut werden, man erhält dann das gleiche Ergebnis.

Das eröffnet den Weg zur Realisierung der Erfindung nach Anspruch 2: Jeder Filter erhält eine eigene Kamera. Die Kameras müssen gegenseitig so justiert sein, daß sie das gleiche Gesichtsfeld haben, d. h. ein bestimmter Oberflächenpunkt des Meßobjekts soll in den verschiedenen Kameras jeweils auf den gleichen Pixel abgebildet werden.

Der technische Vorteil der Realisierung nach Anspruch 2 liegt in einer weiteren Parallelisierung. Nun können die gesuchten Intensitätsverteilungen nämlich gleichzeitig beobachtet werden.

Der nachgeschaltete Dekoder arbeitet genau in der gleichen Art und Weise wie er für die Realisierung nach Anspruch 1 beschrieben worden ist.

Die Sensoren nach Anspruch 1 und nach Anspruch 2 sind informationstheoretisch äquivalent.

Besonders günstig erscheinen Systeme mit bis zu vier Belichtungen (Anspruch 1) bzw. 4 Farbfiltern (Anspruch

2) weil dann noch eine Auswertung per look-up-table möglich ist.

Anhang: Konstruktion einer Kurve für ein System mit mehr als 3 Belichtungen

Bei Systemen mit mehr als drei Belichtungen läßt sich der Zustandsraum nicht mehr bildlich darstellen. Damit stellt sich die Frage, ob bei solchen Systemen eine passende Kurve gefunden werden kann. Diese Frage kann, wie wir sehen werden, positiv beantwortet werden:

Zunächst wollen wir einen Begriff definieren: Als "randständiger Zustand" soll ein Zustand bezeichnet werden, bei dem alle Koordinaten ζ_i entweder den Wert 0 oder den Wert 1 aufweisen.

Eine mögliche Kurve (und damit ein Satz möglicher Intensitätsverläufe) kann nach einem Konstruktionsverfahren gefunden werden. Dieses Verfahren geht von einer Kurve in einer Dimension aus, konstruiert daraus eine Kurve in zwei Dimensionen, dann eine Kurve in drei Dimensionen usw.:

Zur Konstruktion einer Kurve in einem N-dimensionalen Zustandsraum muß vorausgesetzt werden, daß die Konstruktion einer Kurve in einem N-1-dimensionalen Zustandsraum, die bei einem randständigen Zustand beginnt und auch bei einem randständigen Zustand endet, bereits erfolgreich abgeschlossen wurde. Dies ist beim System mit zwei Belichtungen der Fall.

Nun, im N-dimensionalen Fall, ist ein neuer Freiheitsgrad ζ_N hinzugekommen. Die Kurve soll nun folgenden Verlauf haben:

- Es wird zunächst der Anfangspunkt festgesetzt: S_{N+1} soll Null sein. Damit ist ζ_N ebenfalls gleich Null. Die anderen Freiheitsgrade sollen auf den randständigen Anfangszustand der bereits konstruierten Kurve im N-1-dimensionalen Zustandsraum gesetzt werden.
 - Nun durchlaufen wir diese Kurve bis zu ihrem Endpunkt, wobei wir stets $\zeta_N = 0$ beibehalten.
 - Dann wird ζ_N erhöht, und zwar um den Betrag eines transversalen Abstands. Mit dieser Einstellung von ζ_N durchlaufen wir die Kurve erneut, diesmal allerdings mit umgekehrter Parametrisierungsrichtung, weil wir nach Beendigung der Phase 1 am Endpunkt der Kurve angekommen waren.
 - Auf diese Weise alternierend können wir den Referenzwert ζ_N immer wieder um ein Stück erhöhen und gelangen schließlich zum Wert $\zeta_N = 1$.
 - Nun ist S_{N+1} die Beleuchtung, die als Referenzwert dient. Wir müssen nur noch den Unterraum abtasten, der zu diesem (festen) Referenzwert gehört. Dieser Unterraum hat aber die einfache Topologie $[0; 1]^{N-1}$ (Hyperwürfel) und ist mit einem ähnlichen induktiven Verfahren abtastbar:
 - eine Fläche kann abgetastet werden, indem eine Koordinate abwechselnd von 0 bis 1 und wieder zurück läuft, während eine zweite Koordinate schrittweise vergrößert (oder verkleinert) wird.
 - ein Würfel kann abgetastet werden, indem zwei Koordinaten eine Fläche abtasten, während eine dritte schrittweise vergrößert (oder verkleinert) wird.
 - auf diese Weise kann jeder (beliebig hochdimensionale) Hyperwürfel abgetastet werden.
- Am Ende des Verfahrens ist wieder ein randständiger Punkt erreicht worden.

Literatur

- [1] Matthias Gruber: Ein Phasenmessendes Triangulationsverfahren zur parallelen optischen Erfassung der Form dreidimensionaler Objekte, Diplomarbeit Universität Erlangen-Nürnberg, 1991
- [2] Takasaki H.: Moiré topography, Applied Optics 9, 1970
- [3] Thomas Stahs: "3D-Sensorsysteme in der Robotik" in "Automatisierung mit Industrierobotern" herausgegeben von Winfried Rehr, Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg 1989
- [4] Firma ABW, Automatisierung Bildverarbeitung Dr. Wolf, Strohgäugasse 5, 7303 Neuhausen a.d.F.: "Produktbeschreibung Linienprojektor LCD 320 und Codierter Lichtsatz"
- [5] H. Tiziani, Lehrstuhl für technische Optik, Universität Stuttgart: "Dynamische ON-Line 3-D-Konturvermessung", Manuskript im Rahmen des BMFT-Verbundprojekts 3-D-Objektvermessung auf kleinen Entfernungen, Februar 1993
- [6] Dieter Ritter: Parallele optische Formerfassung durch "Farb — Triangulation", Diplomarbeit Universität Erlangen-Nürnberg, 1991

Patentansprüche

1. Optischer Sensor zur Formerfassung dreidimensionaler Objekte, beruhend auf dem Prinzip der pixelweise parallel arbeitenden Sensoren und bestehend aus

- (a) einer Kamera
- (b) einem Belichtungssystem, dessen Aufgabe es ist, die Höhenstufen des Meßobjekts mit verschiedenen Intensitäten zu markieren.
- (c) Einer Dekodierungseinheit, die aus den Kamerasignalen 3D-Daten gewinnen kann durch streifenartige, vom Belichtungssystem projizierte Intensitätsverteilungen gekennzeichnet, die einen bestimmten Verlauf aufweisen:

- (a) Die Intensitätsverteilungen sind maximalitätstreue Funktionen.
- (b) Die den Intensitätsverteilungen entsprechende Kurve im Zustandsraum des Projektionssystems
 - i. ist überschneidungsfrei.
 - ii. weist einen transversalen Abstand von mindestens 3 Konfidenzintervallen auf.
 - iii. überdeckt zusammen mit der von transversalen Abstand gebildeten Umgebung den gesamten

Zustandsraum.

Die kennzeichnenden Merkmale werden erst mit den in der Beschreibung gegebenen Definitionen verständlich.

2. Optischer Sensor nach Anspruch 1, jedoch bestehend aus:

(a) einem System von Kameras, die

i. so justiert sind, daß sie das gleiche Beobachtungsfeld haben

ii. jeweils mit einem Farbfilter versehen sind

(b) einem Belichtungssystem, welches die Höhenstufen des Meßobjekts mit einem Spektrum von Licht verschiedener Wellenlängen markiert.

(c) Einer Dekodierungseinheit, die aus den Kamerasignalen 3D-Daten gewinnen kann

gekennzeichnet dadurch, daß die Transmissionskurven der optischen Filter einen besonderen Verlauf haben, dessen Merkmale identisch mit den Merkmalen der Intensitätsverteilungen aus dem kennzeichnenden Teil von Anspruch 1 sind.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

*

Abb. 1

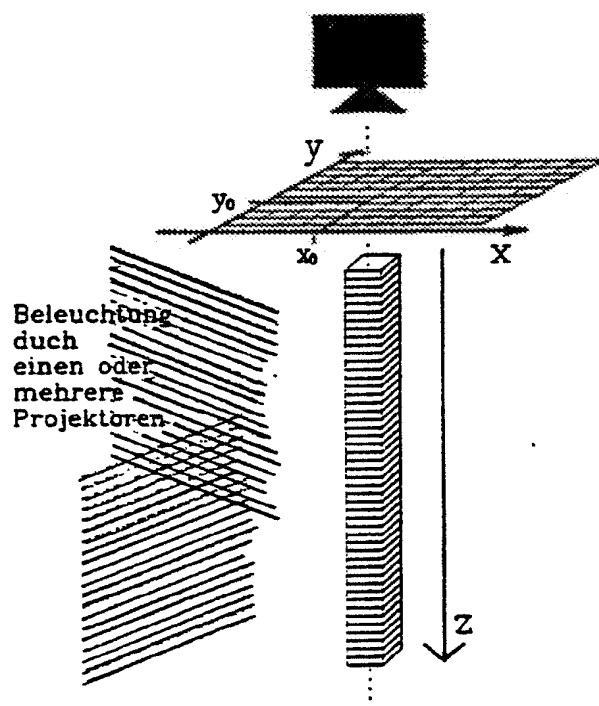


Abb. 2

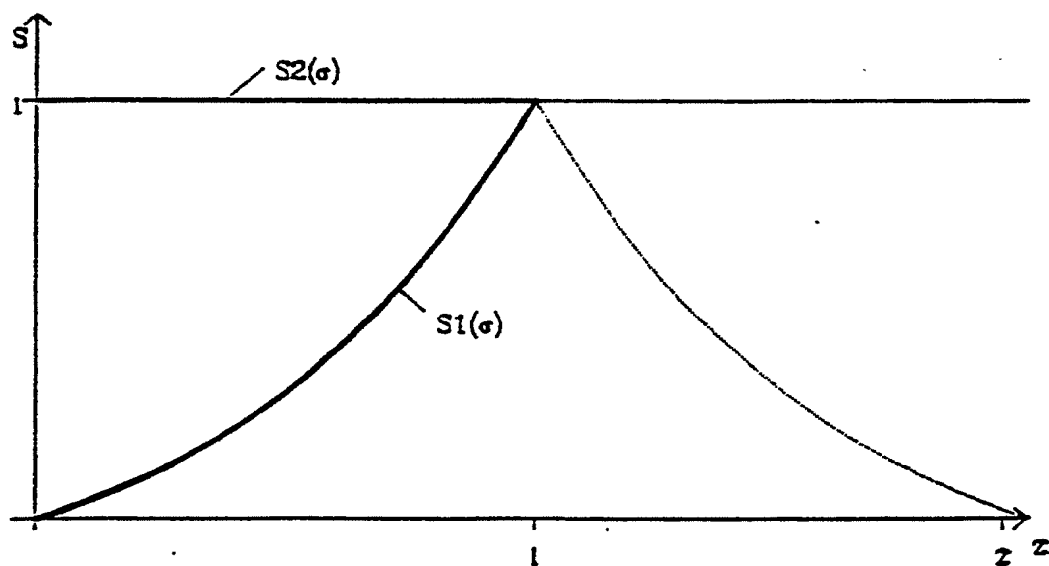


Abb. 3

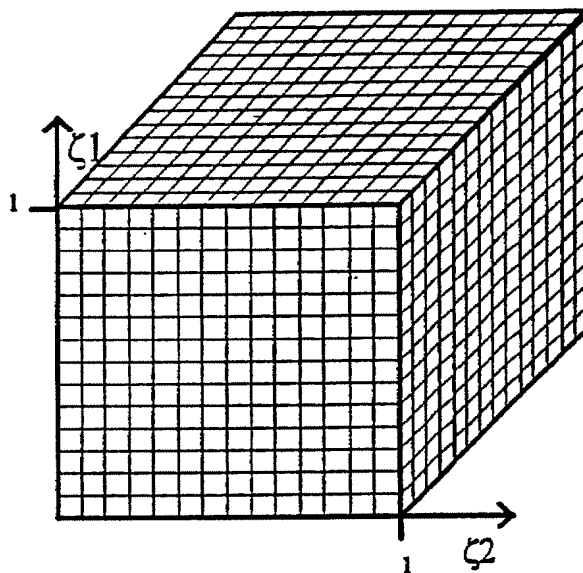


Abb. 4

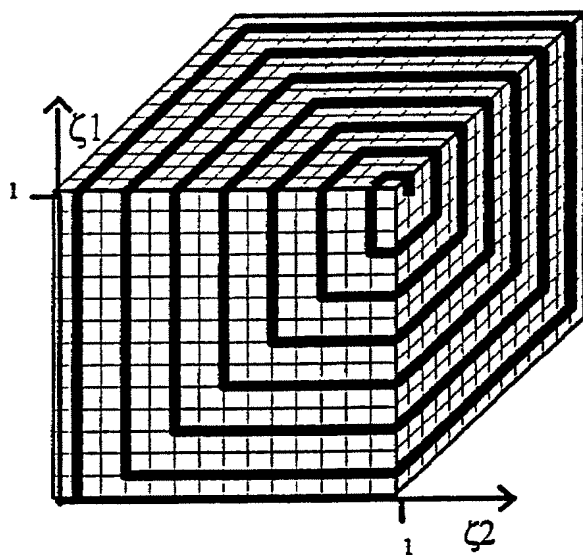


Abb. 5

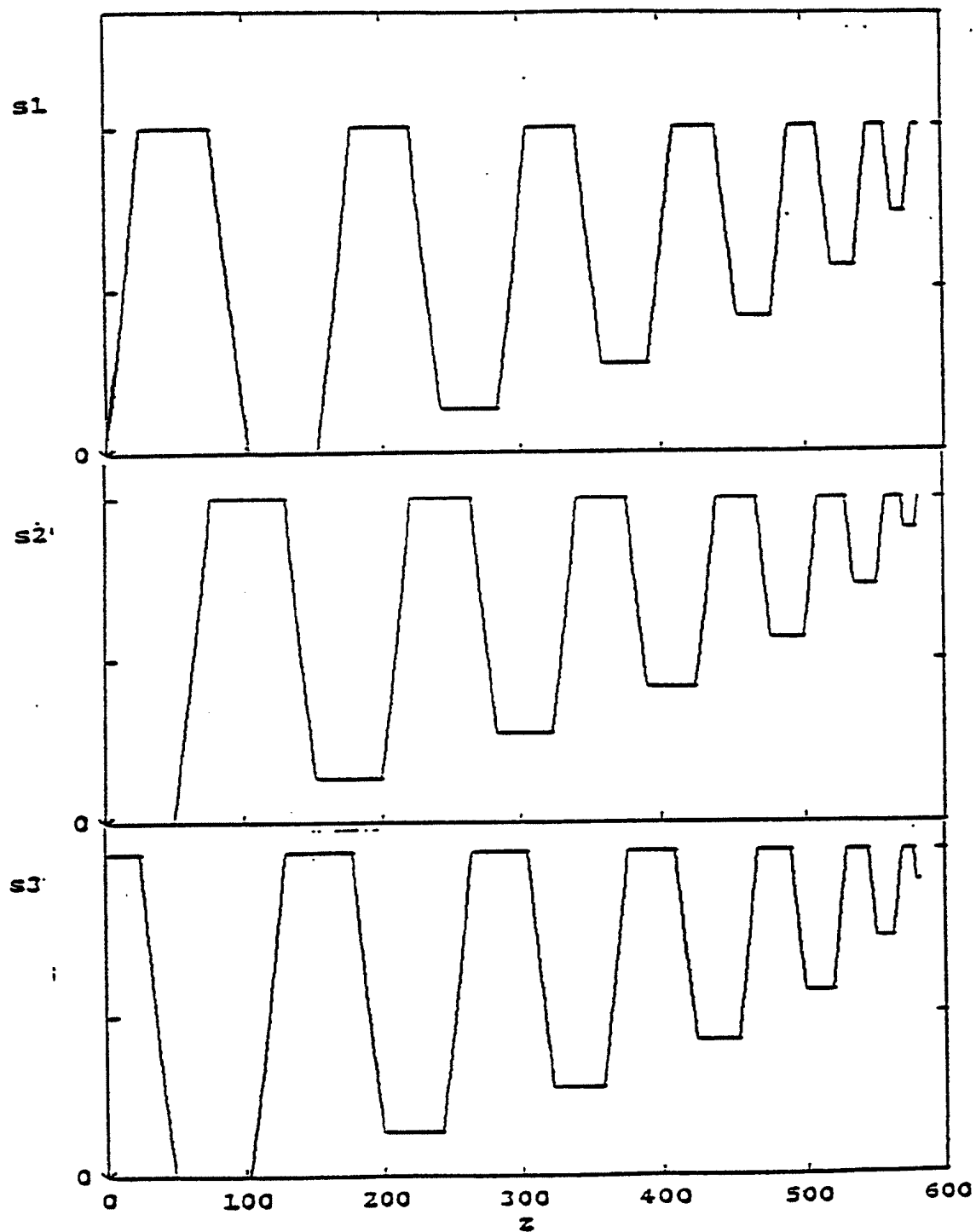


Abb. 6

